



# 8. PREIZKUŠANJE FEROMAGNETNIH SNOVI

V feromagnetiku ugotavljamo odnos med:

- magnetno indukcijo  $\vec{B}$  ali magnetno polarizacijo  $\vec{J}$ , redkeje namagnetenostjo  $\vec{M}$ ,
- in jakostjo magnetnega polja  $\vec{H}$ .





Povezave:

- **makroskopski pogled** na magnetenost, ki se obravnava kot  **dodatno polje** zaradi tokovnih zank.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \kappa_m \vec{H}) = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

- $\mu_0$  - magnetna konstanta ali **permeabilnost vakuuma** :
  - $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$
- $\kappa_m$  - magnetna **susceptibilnost**,
- $\mu_r = 1 + \kappa_m$  - **relativna permeabilnost**,
- $\mu$  - **absolutna permeabilnost**.





- **mikroskopski pogled izhaja iz celotnega magnetnega momenta na enoto prostornine:**

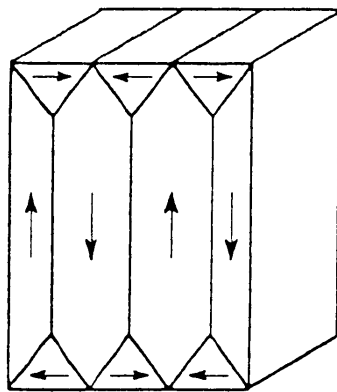
$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{V}$$

- $\vec{m} = i\vec{A}$  - **magnetni moment elementarne tokovne zanke s ploščino  $\vec{A}$ , v kateri teče tok  $i$ .**
  - magnetni moment označuje **magnetni dipol**, kot **izvor magnetnega polja**.

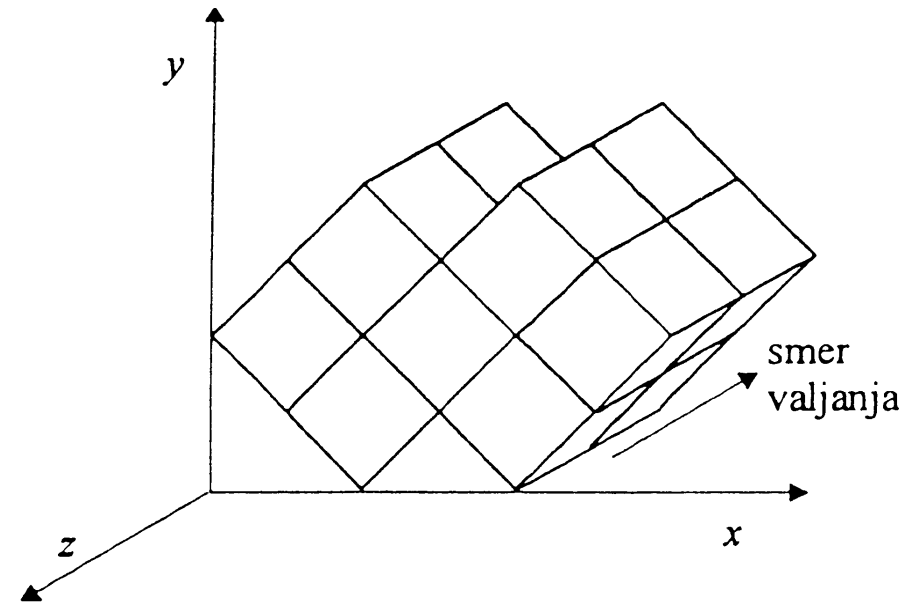




Za feromagnetno snov je značilno, da so **magnetni momenti atomov znotraj določenih (Weissovih) območij** – domen praktično **razvrščeni v isto smer**.



a)



b)

Slika 8.1 Domene v nevtralnem feromagnetiku in Gossova tekstura

V kristalu **nevtralnega feromagnetika** se magnetni **pretok zaključí v samih domenah** (a).





**V zunanjem magnetnem polju začne domena vzporedna polju naraščati na račun drugih.**

- **z večanjem polja se začno magnetni momenti domene obračati v smeri polja,**
  - **ko so vsi vzporedni s poljem, je magnetenje zaključeno → magnetno nasičenje.**

**Kos železa (feromagnetika) je sestavljen iz velike množice majhnih kristalov.**

- **so različno orientirani – različna tekstura.**
  - **Gossova tekstura orientirane silicijeve železne pločevine je magnetno anizotropna.**
    - **lažje se magneti v smeri valjanja (os z)**





Krivulja, ki **povezuje magnetno indukcijo  $B$**  (ali  $J$  ali  $M$ ) in **jakost magnetnega toka  $H$**  je:

**magnetilna krivulja ali magnetilnica:**

- $B-H$ ,  $J-H$  in  $M-H$  magnetilnice

Magnetilnice feromagnetnih snovi so **nelinearne**. Ločimo:

- **statične** magnetilnice,
  - **spreminjanje jakosti polja** ne vpliva na samo magnetilnico (nekaj Hz).
- **dinamične** magnetilnice,
  - magnetilnica se zaradi hitrosti spreminjanja polja spremeni.



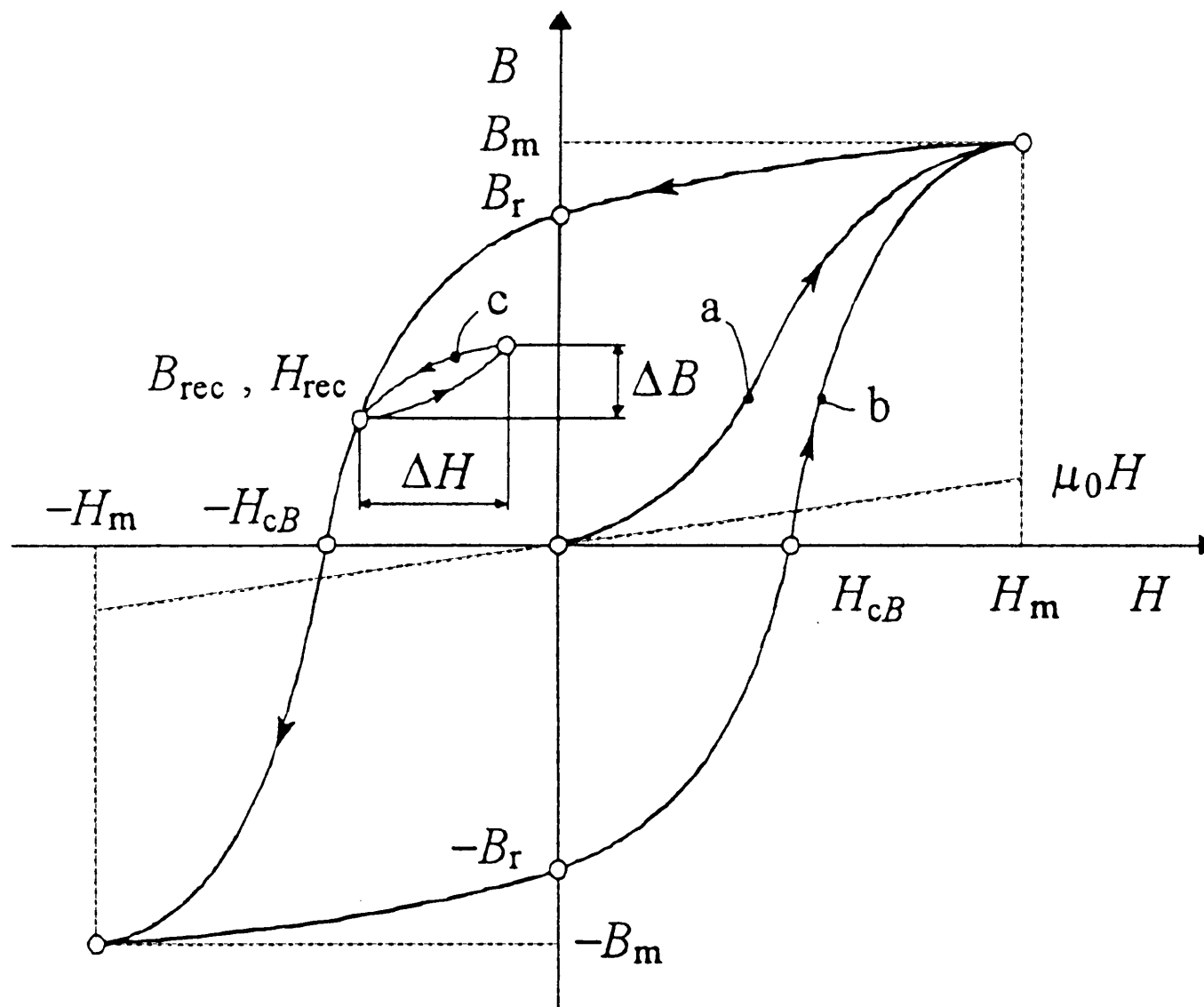


Značilnost magnetilnice je **histerezna zanka**.

- Če nevtralen feromagnetik **izpostavimo** magnetnemu **polju** in ga **nato odstranimo**, indukcija ne pade nazaj na nič,
  - To preostalo vrednost imenujemo **remanenčna magnetna indukcija**.
- Če želimo **odpraviti remanenčno** magnetno indukcijo, moramo feromagnetik **izpostaviti nasprotno usmerjenem magnetnem polju s koercitivno poljsko jakostjo**.



Po enem **ciklu spreminjanja** magnetnega **polja** se magnetna krivulja sklone  $\rightarrow$  **histerezna (B-H) zanka**.



Slika 8.2 Krivulja prvega magnetenja ter histerezna in povratna zanka

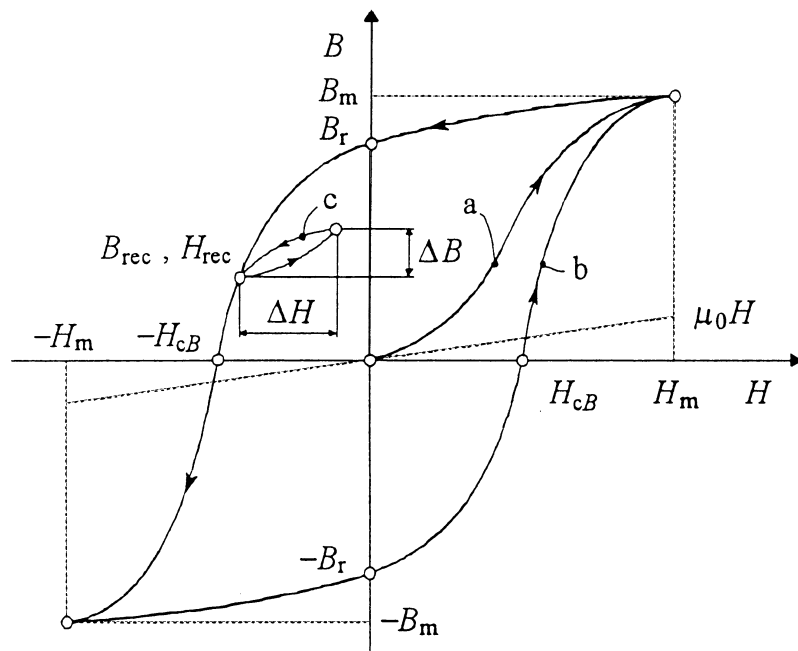






Ločimo:

- **krivulja prvega magnetenja** ali deviška magnetilnica (a),
  - monotonno **naraščajoče magnetenje** iz nevtralnega (nemagnetnega) stanja
- **nasičenjska histerezna zanka**
  - izhaja iz stanja nasičenja
    - na njej leži **remanenca**  $B_r(H = 0)$  in **koercitivnost**  $H_{cB}(B = 0)$ .



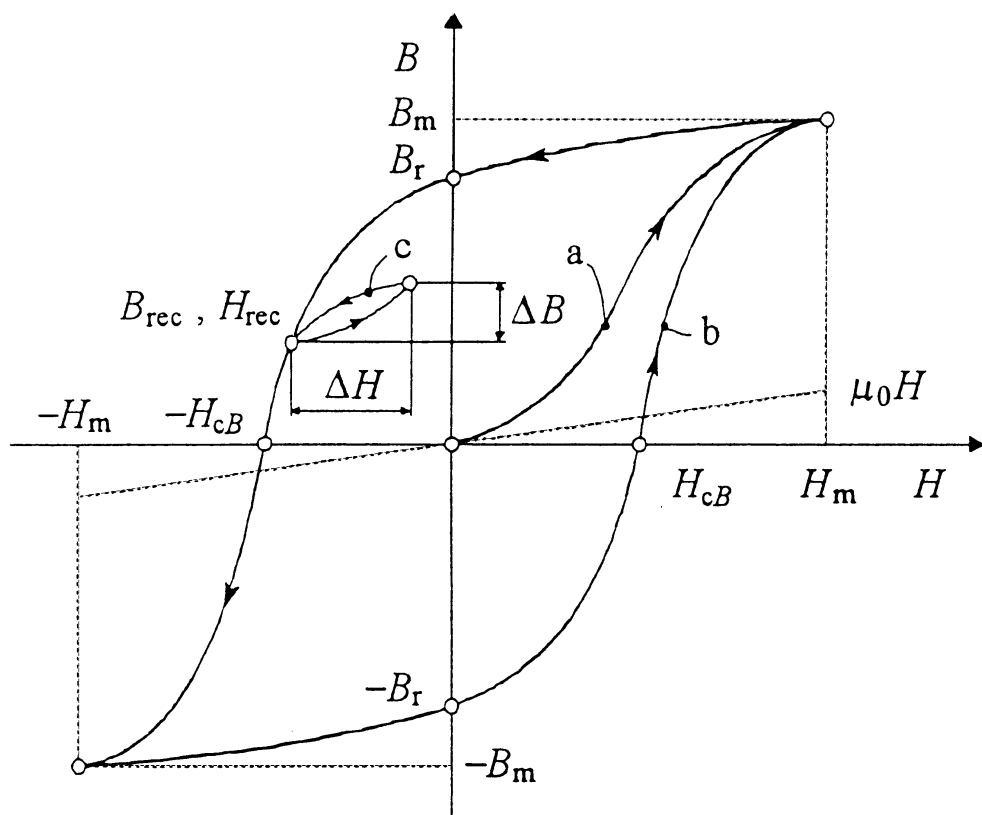


Za trdomagnetne snovi (za trajne magnete) je odločilen del histereze v drugem ali četrtem kvadrantu:

- **razmagnetilna krivulja** (od  $B_r$  do  $H_{cB}$ )

Če v točki  $(B_{rec}, H_{rec})$  popustimo in ponovno povečamo jakost m. polja za  $\Delta H$  se magnetna indukcija spreminja po **povratni krivulji** (c).

- razmerje  $\Delta B / \Delta H$  določa **povratno permeabilnost**  $\mu_{rec}$  (značilen podatek za trdomagnetni material).



Značilen je tudi **maksimalen produkt**  $BH_{max}$  na razmagnetilni krivulji.





**Energija, ki je potrebna za en obhod zanke je sorazmerna njeni površini,**

$\oint H dB$  - spremeni se v toplotno energijo

- enota za  $H$  je: A/m,
- enota za  $B$  je: T = Vs/m<sup>2</sup>
- enota za energijo za en hiterzni cikel na enoto prostornine je tako: J/m<sup>3</sup>

$$P_s = \frac{f}{\rho} \oint H dB$$

- Če je  $f$  obhodov histerezne zanke v časovni enoti in ima snov gostoto  $\rho$  dobimo **specifične izgube**  $P_s$  v W/kg.

Z večanjem frekvence  $f$  se dodajajo še **vrtilčne izgube**

- zaradi spreminjanja magnetnega pretoka se v snovi **inducira napetost**, ki požene t.i. **vrtilčne tokove** na ohmski upornosti feromagnetika.
- **histerezna zanka** je zaradi vrtilčnih izgub **večja** kot statična zanka.





**Specifične izgube**  $P_s$  so sestavljene iz :

- **histereznih izgub**  $P_h$  in
- **vrtinčnih izgub**  $P_e$ .

$$P_s = P_h + P_e = \frac{f}{\rho} \oint H \, dB$$

Pomembna je tudi **oblika magnetenja** ( $B$  in  $H$ )

- vrtinčne izgube so ponavadi podane za sinusno obliko

Pri **zelo nizkih**  $B$  in **visokih frekvencah** (telekomunik.) pridejo do izraza preostale izgube (absorpcijske itd.)





## *8.1 Merjenje magnetne indukcije in jakosti magnetnega polja*

**Magnetno indukcijo** merimo s tuljavico, ki naj bo tesno navita na merjenec.

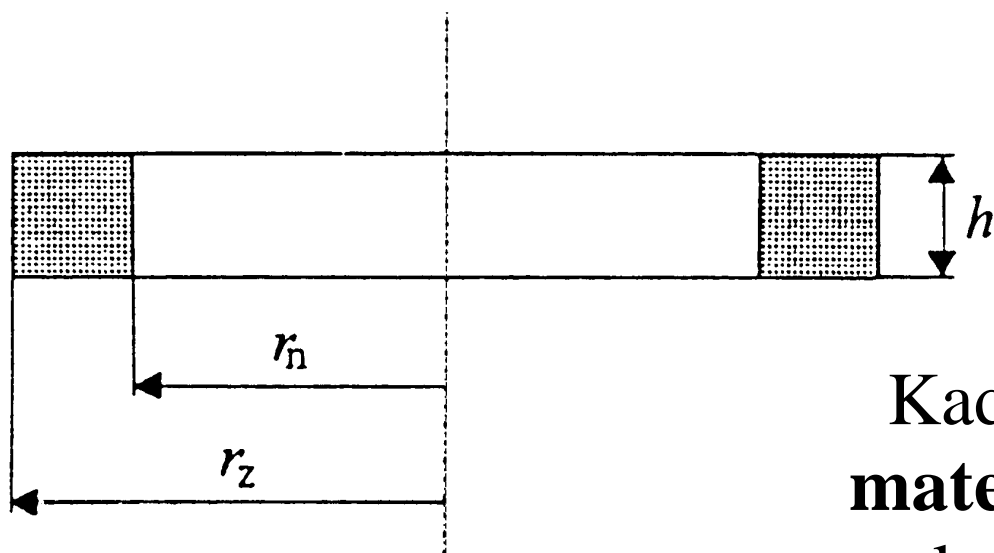
**Jakost magnetnega polja** pa merimo:

- a) **prek magnetilnega toka,**
- b) **ali merjenja magnetne indukcije v zraku  $B_0$  tik ob merjencu.**





## a) Jakost magnetnega polja prek magnetilnega toka



Slika 8.3 Toroid

Kadar je magnetni **krog sklenjen v materialu** (toroid ali trakovi zloženi v krožno obliko), določimo  $H$  iz magnetilnega toka in srednje dolžine silnice.

$$H = \frac{\oint \vec{H} d\vec{s}}{l_{\text{sr}}} = \frac{IN}{l_{\text{sr}}}$$

- za toroid velja:  $l_{\text{sr}} = 2\pi \frac{(r_z - r_n)}{\ln(r_z/r_n)}$

- če  $(r_z - r_n) \leq r_z/5$  potem:  $l_{\text{sr}} = \pi(r_n + r_z)$





**b) Jakost magnetnega polja prek merjenja  $B_0$  tik ob merjencu**

Z merjenjem  $B_0$  tik **ob merjencu** lahko ugotovimo  $H$  v merjencu, ker **prehaja tangencialna komponenta** jakosti polja **zvezno iz enega sredstva** (feromagnetik) v drugo (**zrak**).

$$H = \frac{B_0}{\mu_0}$$

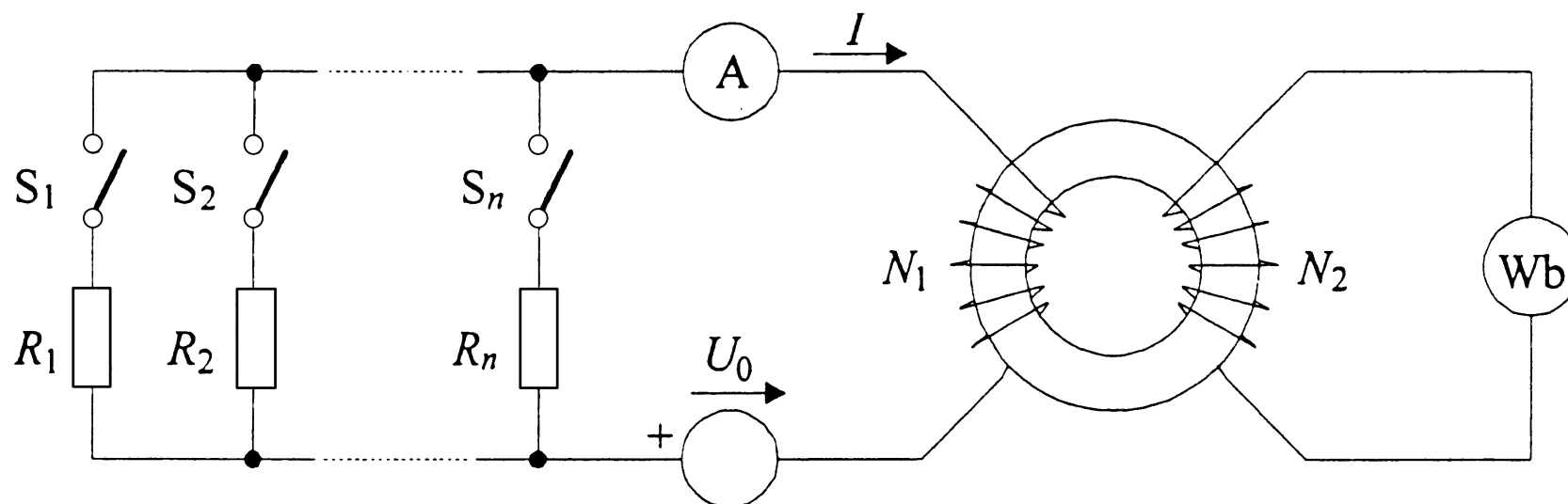
- $B_0$  merimo s Hallovo sondo ali indukcijsko tuljavico,
- če se merjencu **ne moremo dovolj približati**, merimo na **več razdaljah in ekstrapoliramo**.



## 8.2 Snemanje statičnih magnetilnic

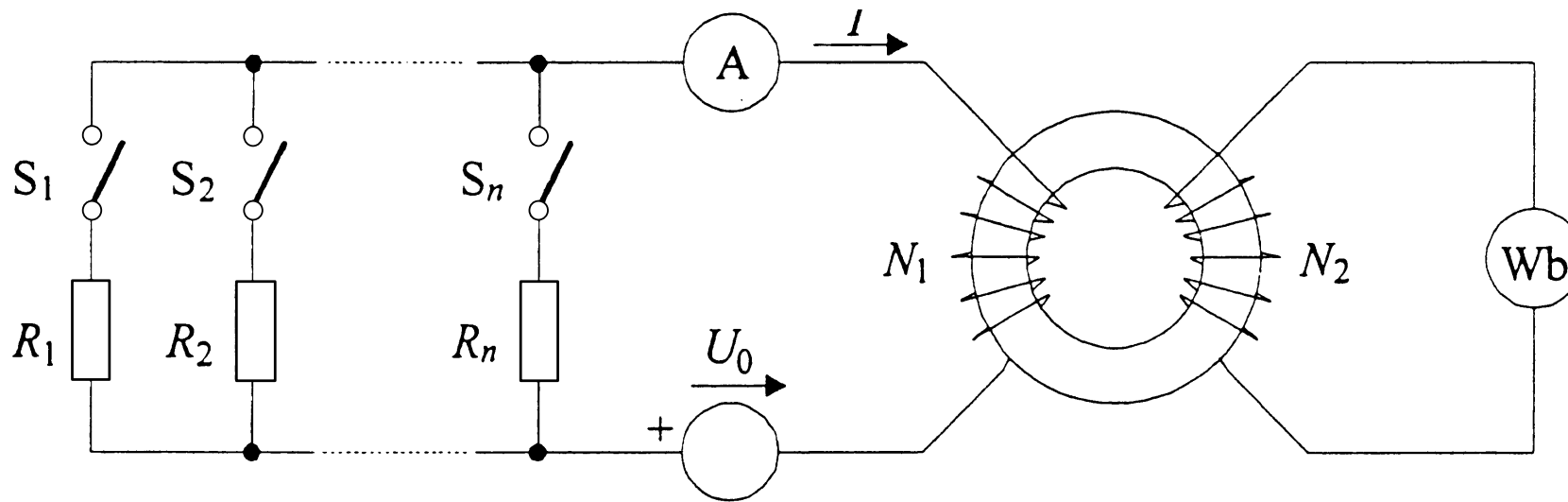
Za snemanje **deviške magnetilnice** potrebujemo:

- **enosmerni** napajalni vir,
- možnost **postopnega koračnega povečevanja** vzbujanja (preko stikal:  $S_1, S_2, \dots, S_n$ ),
- meriti moramo **ploščine napetostnih impulzov** (npr. s fluksmetrom).



Slika 8.4 Snemanje krivulje prvega magnetenja





Če povečujemo tokove od nič na  $I_1, I_2, \dots, I_n$  se povečuje tudi jakost magnetnega polja:  $H_1, H_2, \dots, H_n$   $H_k = \frac{I_k N_1}{l_{sr}}$

- samo ob vklopu stikal se inducira **napetostni impulz**:

$$u_i = -N_2 A \frac{dB}{dt}$$

- pri k-tem vklopu je **ploščina** enaka (s **fluksmetrom**):

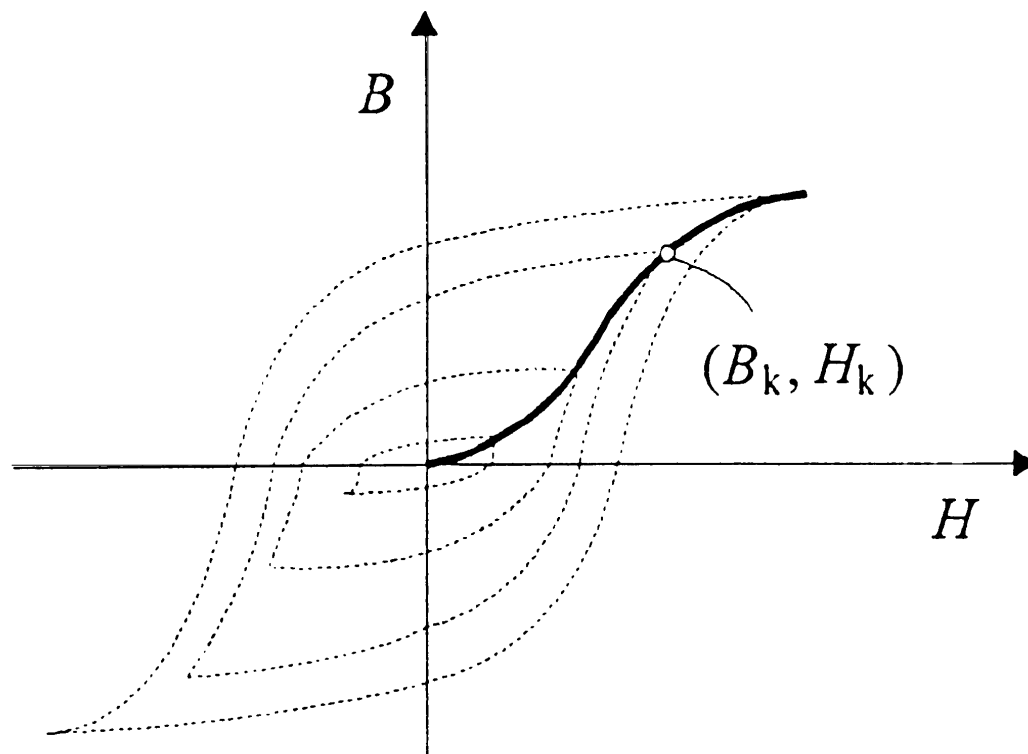
$$\int_{t(B_{k-1})}^{t(B_k)} u_i dt = -N_2 A \int_{B_{k-1}}^{B_k} dB = -N_2 A \Delta B_k \Rightarrow \Delta B_k = \frac{C_F y_k}{N_2 A}$$





Namesto **odsekovnega merjenja** celotne krivulje (pogreški se seštevajo) se pogosto uporablja **komutacijska magnetilnica**:

- **povezuje vrhove histereznih zank za različne stopnje magnetenja.**
  - pri počasi spreminjajočem se magnetenju imamo **statično komutacijsko magnetilnico**

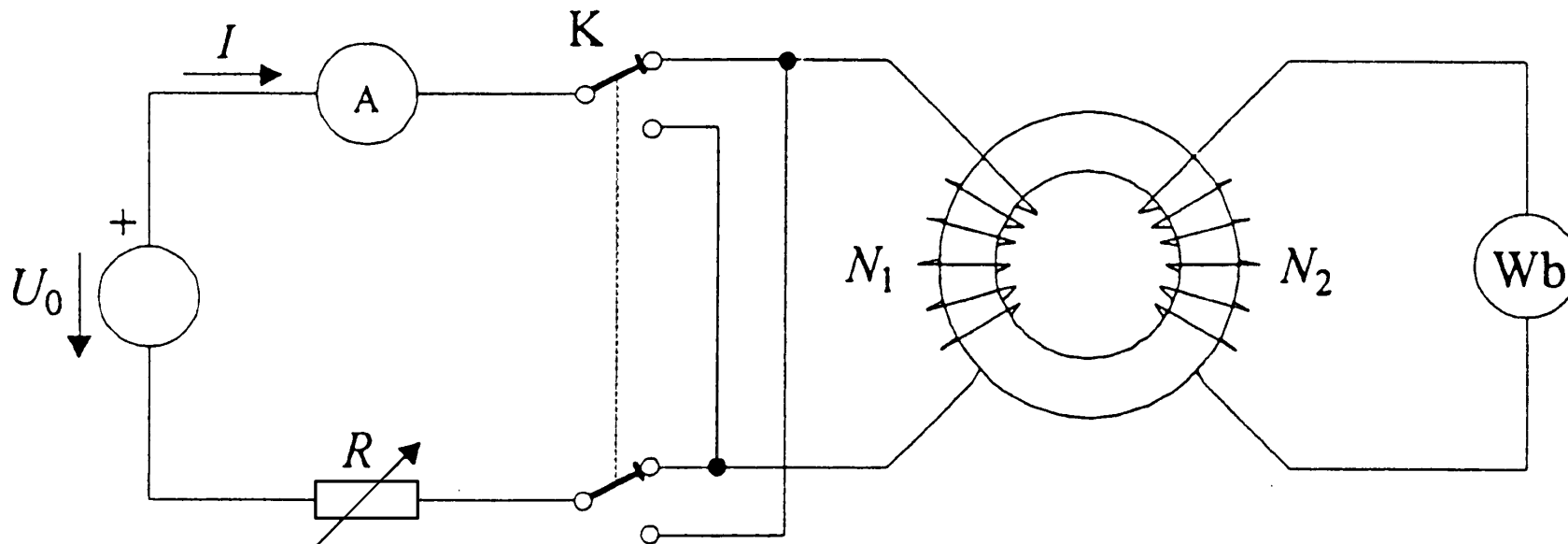


Slika 8.5 Statična komutacijska magnetilnica





Za menjavo smeri magnetenja potrebujemo **komutator**:

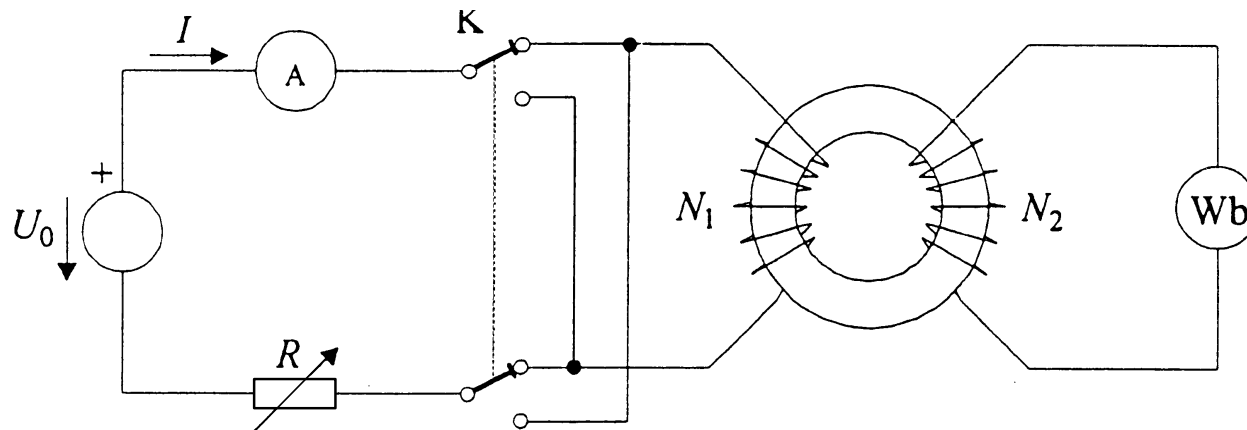


Slika 8.6 Snemanje statične komutacijske magnetilnice

**Postopek** snemanja statične komutacijske magnetilnice:

- material najprej **razmagnetimo**,
  - material vzamemo **iz počasi pojemajočega** magnetnega polja,





## Postopek snemanja statične komutacijske magnetilnice:

- nastavimo nek **začetni tok**  $I_1$  in dobimo točko na magnetilnici ( $B_1, H_1$ )
- **komutiramo** smer toka  $\rightarrow (-B_1, -H_1)$   
in **nazaj**  $\rightarrow (B_1, H_1)$
- ob  $k$ -tem koraku imamo :

- jakost m. polja: 
$$H_k = \frac{I_k N_1}{l_{sr}},$$

- m. indukcija: 
$$\int_{t(-B_k)}^{t(+B_k)} u_i dt = -N_2 A \int_{-B_k}^{B_k} dB \Rightarrow B_k = \frac{c_F y_k}{2N_2 A}$$

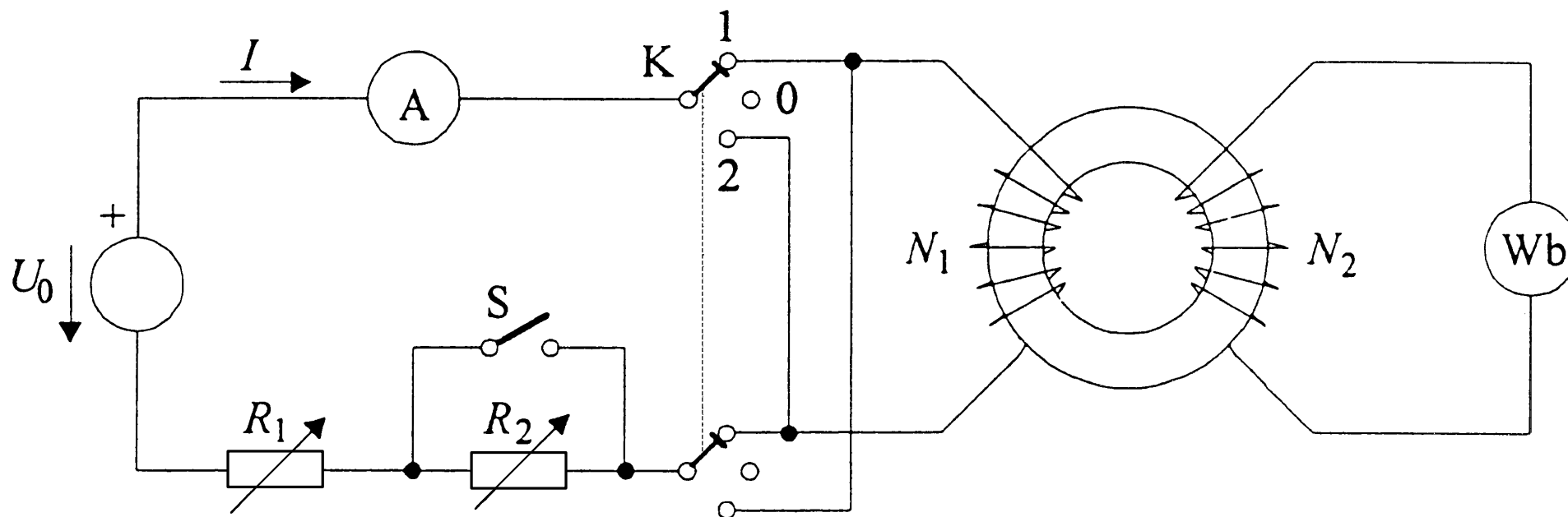
- **tok mora** med meritvijo samo **naraščati**.





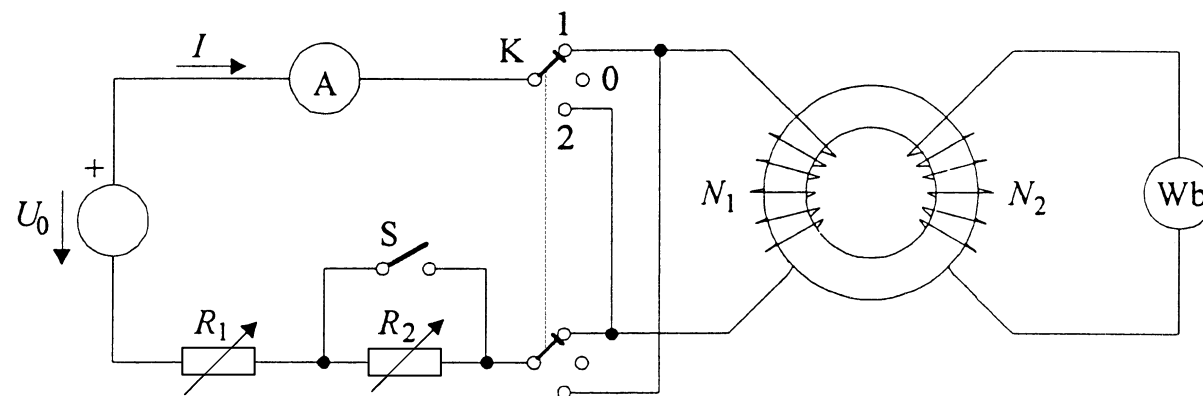
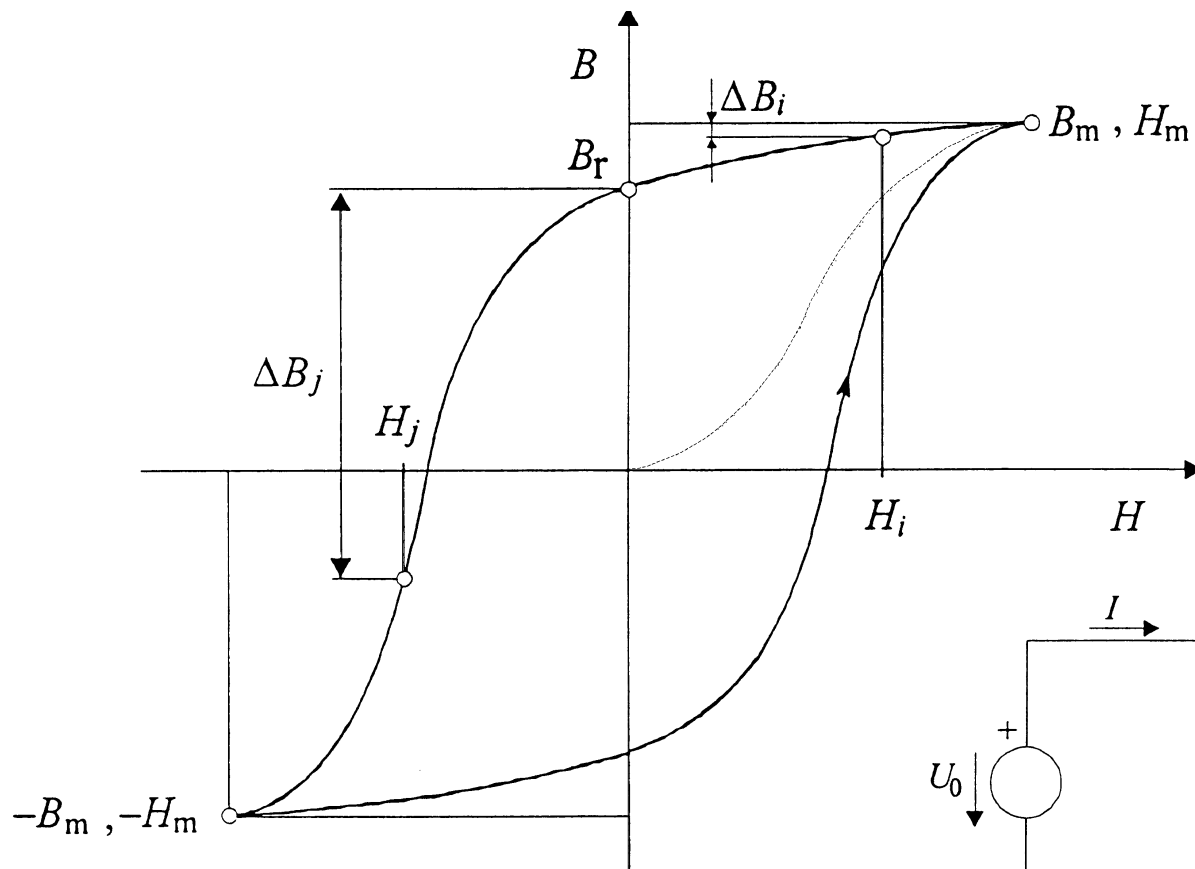
## *Snemanje statične histerezne zanke*

Najprej nastavimo željeno zanko (npr. pri  $B_m = 1,7\text{T}$ ), nadaljnje meritve morajo potekati samo po **izbrani histerezni zanki**.



Slika 8.7 Snemanje statične histerezne zanke



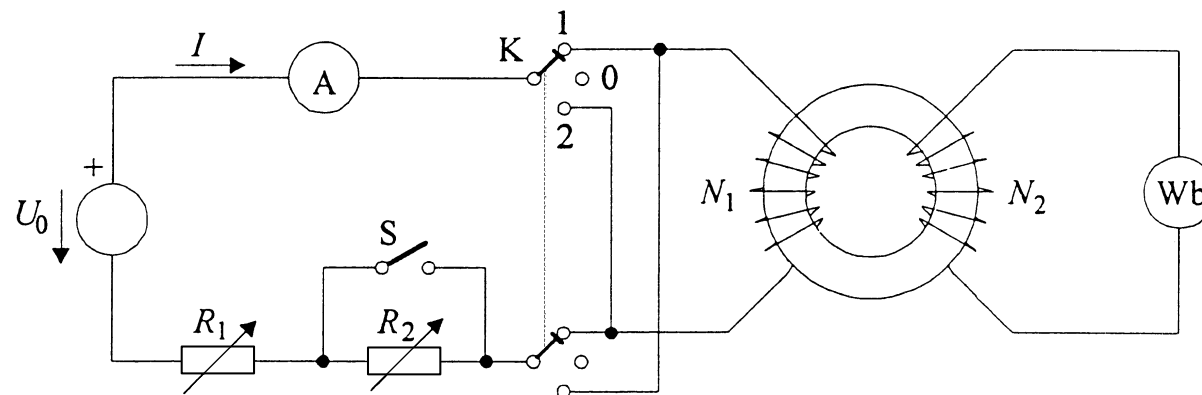
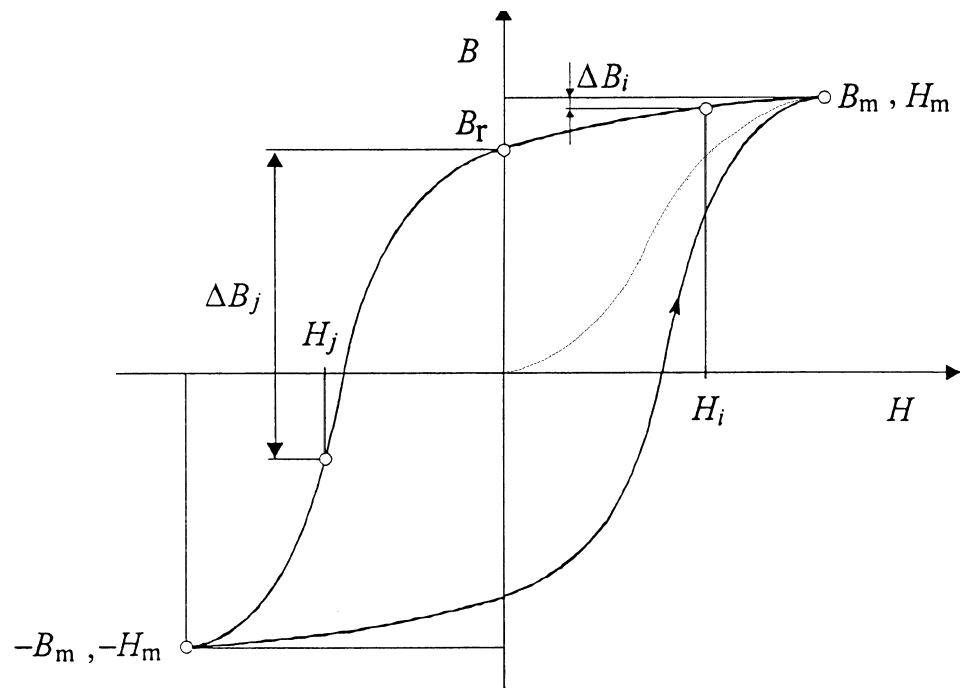


## Postopek snemanja statične histerezne zanke:

- najprej **nastavimo**  $B_m$ 
  - stikalo S je sklenjeno,
  - **dvojna vrednost**  $B_m$  zaradi komutiranja:

$$y_1 = \frac{2N_2 A}{C_F} B_m$$





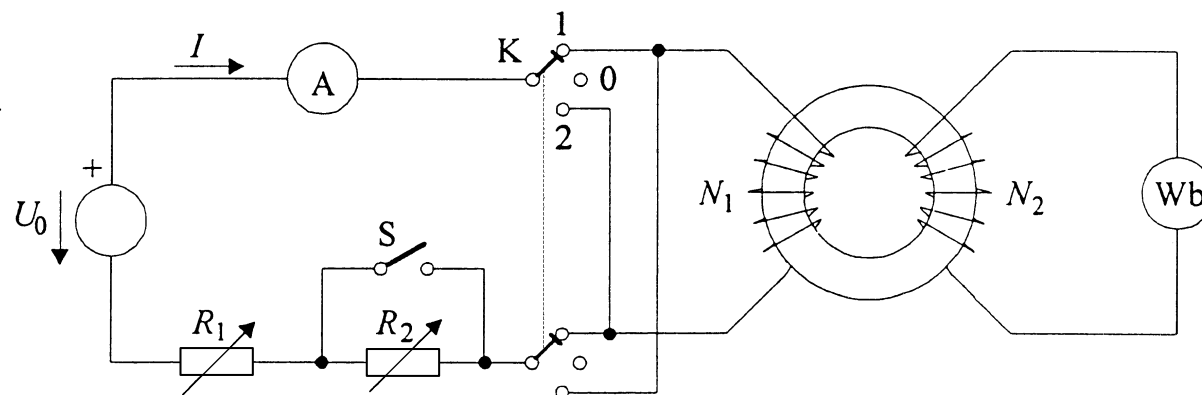
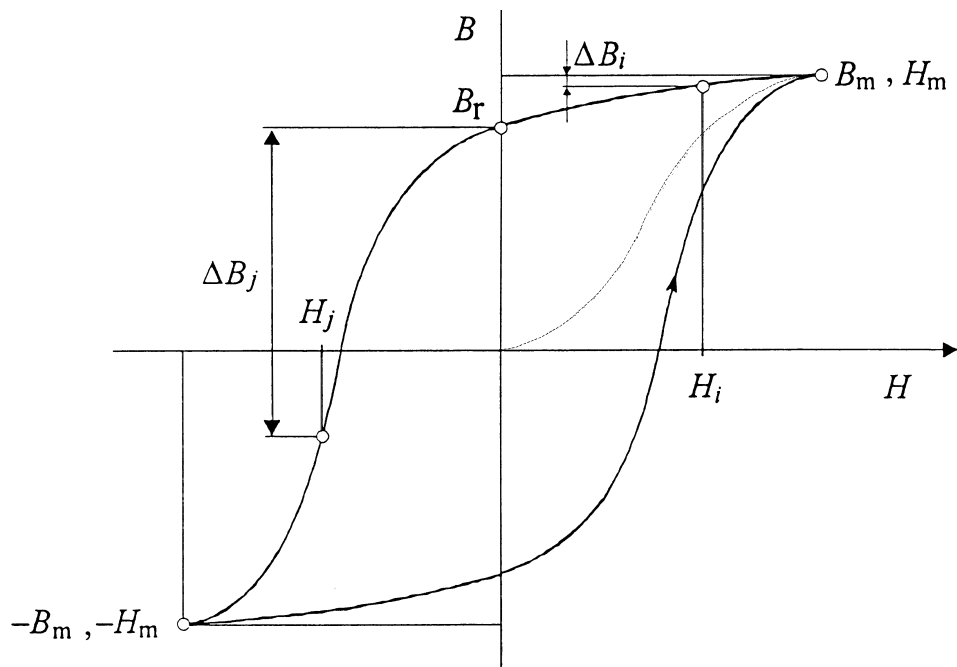
- ko je **izhodiščno stanje** postavljeno ( $B_m, H_m$ ), začnemo snemati **točke na histerezni zanki**:
  - **točke med  $B_m$  in  $B_r$**  merimo **preko razlike**, ko razklenemo stikalo S:

$$\Delta B_i = \frac{c_F y_i}{N_2 A} \rightarrow B_i = B_m - \Delta B_i; \quad H_i = \frac{I_i N_1}{l_{sr}}$$

- do naslednjih točk pridemo po obhodu histereze:

$$\rightarrow B_r, \rightarrow (-B_m, -H_m), \rightarrow (B_m, H_m)$$





- **remanenčno indukcijo dobimo z izklopom toka:**

$$\Delta B = B_m - B_r = \frac{c_F y_r}{N_2 A} \Rightarrow B_r = B_m - \frac{c_F y_r}{N_2 A}$$

- **točke med  $B_r$  in  $(-B_m, -H_m)$  snemamo z razlikami  $\Delta B_j$  pri vklapljanju toka v negativno smer:**

$$\Delta B_j = \frac{c_F y_j}{N_2 A} \rightarrow B_j = B_r - \Delta B_j$$

$$H_j = I_j N_1 / l_{sr}$$

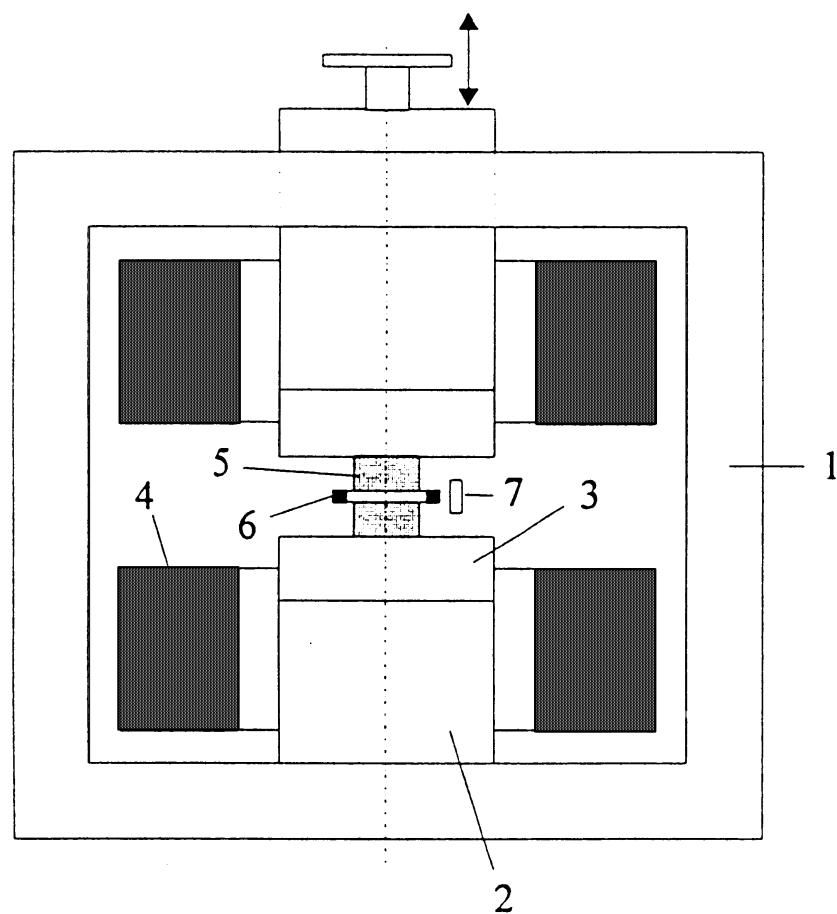






## *Magnetni jarem (permeameter)*

Pri trdomagnetnih snoveh (toroida se ne da izdelati) se uporablja magnetni jarem.



Slika 8.9 Magnetni jarem

4 – magnetilni tuljavi

5 – vzorec

6 – indukcijska tuljavica

7 – senzor za  $H$

**Magnetni krog se sklence:**

- z **jarmom** (1) iz mehkomagnetnega materiala,
- in **poloma** (2) z gibljivima nastavkoma (3).
  - **lamelirane izvedbe** za zmanjšanje vrtilnih tokov.
  - da bo **magnetenost enakomerna**, mora biti **premer polov najmanj dvakrat večji** kot od njune medsebojne **razdalje**.





## Magnetno indukcijo merimo z indukcijsko tuljavico:

$$u_i = -N_2 A \frac{dB}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} (AB)$$

- zaradi velikih jakosti (nekaj 100 kA/m), **pretok v zraku**  $\phi_0$  med merjencem in tuljavo **ni zanemarljiv**,
- popravljeno (korigirano) vrednost  $B_{\text{kor}}$  dobimo:

$$u_i = -N_2 \frac{d}{dt} [AB_{\text{kor}} + (A_t - A)\mu_0 H]$$

$$\blacksquare AB = AB_{\text{kor}} + (A_t - A)\mu_0 H$$

$$B_{\text{kor}} = B - \mu_0 H \frac{A_t - A}{A}$$





## Jakost magnetne indukcije merimo:

- s parom v **protistik vezanih tuljavic**,
  - zajamemo samo magnetni pretok v merjencu,
- z merilnikom **magnetene napetosti**,
  - tuljavica Rogowskega oz. Chattock tuljavica
- s Hallovo sondo.

**Postopek** snemanja magnetilne krivulje je enak postopku snemanja **statične histerezne zanke**.

Če je **senzor za  $H$  par tuljavic** (z  $N_H A_H$ ) dobimo **ob komutaciji**:

$$u_H = -N_H A_H \mu_0 \frac{dH}{dt}$$

- ploščina impulza in  $H$ :  $\rightarrow H_j = \frac{C_F y_H}{\mu_0 N_H A_H}$

$$\int_0^t u_H dt = -N_H A_H \mu_0 \int_0^{H_j} dH = -N_H A_H \mu_0 H_j$$

